第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

甘肃省主要地质灾害精细化气象风险预警预报

张君霞[1]， 黄武斌[1]， 李安泰[2]， 杨秀梅[1]， 黎 倩[1]， 边宏伟[2]

（1. 兰州中心气象台，甘肃 兰州 730000；2. 兰州大方电子有限责任公司，甘肃 兰州 730000）

摘 要： 甘肃省是我国地质灾害多发的省份之一，降水型地质灾害占比重。利用甘肃省2013—2021年4—10月地质灾情数据、加密降水观测资料和地面-雷达-卫星三源融合降水分析产品（CMPAS），选取有效雨量代表降水致灾因子，建立黄土高原和陇南山地有效雨量致灾概率方程，以有效雨量致灾概率、地质灾害潜在危险度、易损度为因子构建甘肃省地质灾害气象风险精细化网格预警模型，并应用实况降水资料和兰州中心气象台精细化网格定量降水预报产品，建立地质灾害气象风险精细化网格预报试验，检验模型的预警效果。结果表明：（1）基于有效雨量致灾概率分别给出了黄土高原和陇南山地地质灾害气象风险蓝色、黄色、橙色和红色预警的临界雨量阈值，其中，陇南山地蓝色和红色预警临界雨量阈值分别为40.6 mm和113.5 mm，远高于黄土高原的18.0 mm和73.6 mm。（2）确定了甘肃省地质灾害气象风险蓝色、黄色、橙色和红色预警的风险度判别指标，数值介于0.004~1.000，其中0.336~1.000表示红色预警。（3）甘肃省地质灾害气象风险精细化网格预警模型能够较好预警地质灾害事件，各等级预警的比例合理，且能有效降低高等级预警率和空报率，该模型具有较强的地质灾害气象风险预警能力。

关 键 词： 地质灾害；气象风险；有效雨量；有效雨量致灾概率；甘肃省

文章编号： 1000－6060(2023)09－1443－10(1443～1452)

地质灾害（主要指滑坡、崩塌、泥石流等）的形成与地质条件、气象条件、人类工程活动等多种因素的综合作用密切相关，而降水是诱发地质灾害的主要外部因素[1-5]。全国地质灾害中，全部的泥石流、90%的滑坡和81%的崩塌由降水诱发[1]，地质灾害发生与降水关系密切，可用降水预报预警地质灾害。国内外对降水诱发地质灾害的物理机制和预报预警方法进行了大量研究[6-16]。已有研究认为，对于降水型地质灾害而言，当前降水、前期降水、降水强度及降水持续时间等是建立地质灾害临界雨量预报方法的重要因子[3,14,17-19]，不同强度和持续时间降水的阈值不尽相同[10-11]。因此，精细准确的降水预报对地质灾害气象风险预警至关重要。近年来，全球/区域数值天气预报模式已可以给出较准确的定量降水预报，传统统计方法和机器学习等模式后处理技术有效降低了模式降水预报误差[20]，同时我国在多源信息融合同化[21]与多尺度模式基础上发展的无缝隙精细化智能网格降水预报，有效提升了降水预报能力[22]。

甘肃省地处黄土高原、青藏高原和蒙古高原交汇地带，呈东南-西北向跨越黄河流域、长江流域上游和内陆河流域，地质构造复杂，地势落差大，大部分地带植被覆盖率低，加之人类工程活动逐步增强，近年来局地短历时强降水天气增多等，致使地质灾害频发。已有灾情研究表明，由降水引发的地质灾害占总数的45%~95%，高发期是6—9月[9]，80%的泥石流、滑坡、崩塌等发生在7—8月，且具有突发性、群发性和滞后性特征。受地形地貌、降水

收稿日期： 2022-12-13； **修订日期：** 2023-03-31
基金项目： 干旱气象科学研究基金（IAM202206）；甘肃省青年科技基金计划（21JR7RA703）；甘肃省气象局人才专项（2122rczx-青年优秀科技人才-05）；甘肃省科技计划（20YF3FA012）；甘肃省自然科学基金（21JR7RA702）资助
作者简介： 张君霞（1990-），女，硕士，工程师，主要从事预报技术研究. E-mail: 18419611389@163.com
通讯作者： 黄武斌（1990-），男，学士，高工，主要从事客观订正技术研究. E-mail: hwb0707@sina.com

时空分布、地层岩性、地质构造、人类工程活动和人口分布密度等因素的影响和控制，甘肃省地质灾害风险分布呈现东高西低的特征，东部黄河、长江流域地质灾害数量多、发生的风险高；西部内陆河流域特别是走廊平原地质灾害数量稀少，大部属低风险区。郭富赟等[9]给出了4条典型泥石流不同时效的临界雨量，并计算了甘肃省滑坡、泥石流地质灾害发生的临界雨量系数，但计算过程相对复杂。李宇梅等[6]建立的地质灾害气象风险预警模型，在全国大部分地区的预警效果较好，但通过检验发现在甘肃省的预警能力有待提升。因此，基于精细化网格降水预报，开展甘肃省降水型地质灾害气象风险预警方法研究，对于保护人民生命财产安全、促进区域经济发展、维护民族团结及防灾减灾等，均具有重要的现实意义。

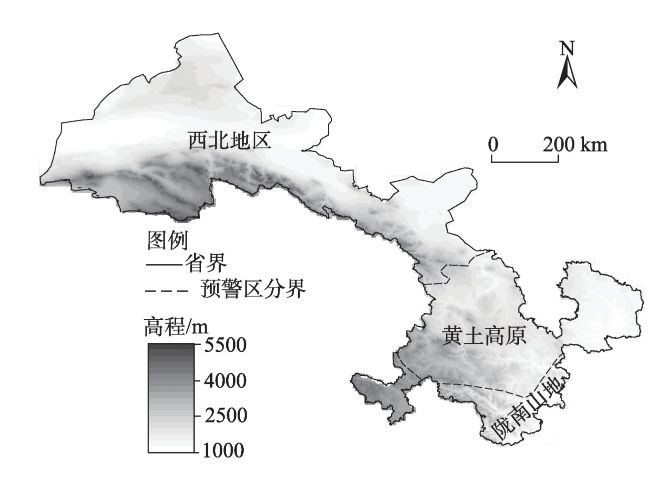
1 资料与方法

1.1 数据来源

2013—2021年4—10月地质灾情记录资料由甘肃省地质环境监测院提供，同期加密降水观测资料、国家气象信息中心研发的地面-雷达-卫星三源融合降水分析产品（CMPAS）以及精细化网格定量降水预报产品（QPF）均由兰州中心气象台提供。其中，QPF空间分辨率为0.05°×0.05°，CMPAS降水产品空间分辨率为0.01°×0.01°，时间分辨率均为1 h。QPF在甘肃省的预报效果较好，已在实际业务预报中得到验证，CMPAS在中国区域质量较优[21]。另外，地质灾害潜在危险度和易损度资料由中国气象局提供，对其重采样为分辨率为0.05°×0.05°的网格数据。灾情点降水数据取其距离最近的自动站观测降水，在附近没有降水观测的灾情点，按照最邻近原则，提取CMPAS降水产品为该灾情点的降水数据。

1.2 分析方法

在地质灾害易发程度评价的基础上，根据甘肃省降水气候特征、植被分布、地形地貌及地质灾害风险等因素，将甘肃省可分为西北地区（内陆河流域）、黄土高原（黄河流域）、陇南山地（长江流域）3个风险预警区域（图1）。其中，陇南山地主要包括甘南藏族自治州西南部、陇南市及天水市南部，该区域降水相对丰富，属于半干旱-半湿润区；黄土高原主要包括甘肃省中部及平（凉）庆（阳）地区，人口分布密集，人类工程活动强烈，降水相对较多，属于半干旱区，地质灾害易造成严重的经济损失和人员伤亡；西北地区人口相对分散，且降水稀少，属于干旱区。因此，本研究主要关注黄土高原和陇南山地区域的地质灾害气象风险预警。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，地图边界无修改。下同。

图1 甘肃省地质灾害气象风险预警分区

Fig. 1 Regions of meteorological risk early warning in Gansu Province

有效雨量是指前期进入岩土体且对滑坡、泥石流、崩塌等发展有贡献的降雨量，已有多位学者在地质灾害研究及预警中使用有效雨量作为主要降水致灾因子[5,8,23-25]。张国平等[8]研究指出，相同精度前提下，有效雨量相对于当日雨量，对站点密度要求更低，而甘肃省部分地区气象观测站点相对稀疏，因此本文选取有效雨量作为地质灾害降水致灾因子。

有效雨量经验计算公式[6,8]如下：

$$E_r = \sum_{k=0}^{n} P^k r_k \tag{1}$$

式中：E_r为有效雨量（mm）；n为灾害发生前降雨日数（d），n=14；P为与蒸发因素有关的递减系数，取值0.8；r_k为灾害前第k天的降雨量（mm）。

按式（1）计算所有灾情点的有效雨量序列，对应甘肃省黄土高原、陇南山地2个分区将有效雨量序列分为2组，逐区对有效雨量进行百分位排序，得到诱发地质灾害的有效雨量致灾概率样本，对其开展幂函数、二次和三次方拟合，选取最优拟合方程

建立该地区有效雨量致灾概率拟合方程，即可得灾情点有效雨量致灾概率，并将其插值为0.05°×0.05°的网格数据。对致灾概率、易损度和潜在危险度归一化，建立甘肃省地质灾害气象风险精细化网格预警模型，简称地质灾害气象风险模型，为了便于与李宇梅等[6]研究比较，后文简称为本地模型。

2　结果与分析

2.1　甘肃省地质灾害概况

2.1.1　*地质灾害隐患点概况*　据统计，截止2021年底，甘肃省共有滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害隐患点共13988个(图2)。按发育类型统计，其中滑坡7560个、泥石流4016个、崩塌2412个；按分布区域统计，河东地区(含黄河流域、长江流域)共13456个，占全省地质灾害隐患点总数的96%，其中滑坡7481个、泥石流3676个、崩塌2299个；河西地区(即内陆河流域)共531个，占全省地质灾害隐患点总数的4%，其中滑坡79个、泥石流340个、崩塌112个。进一步统计发现，长江流域的陇南山地是地质灾害分布密度最大且发生频率最高的地区，有群发性特征，以滑坡、泥石流和崩塌为主要灾害类型；黄河流域的黄土高原地区是地质灾害隐患点密度次大值区，以局地性爆发为主，兼有群发性特征；内陆河流域所在的西北地区是地质灾害分布密度最小且发生频率最低的地区，以小型泥石流为主。

2.1.2　*甘肃省地质灾害易损度和潜在危险度*　就地质灾害易损度而言(图3a)，黄土高原属高、较高易损区，陇南山地主要城镇和西北地区走廊平原绿洲区属较高、低易损区，省内其余地带属极低易损区。就地质灾害潜在危险度而言(图3b)，黄土高原及陇南山地属高、较高地质灾害潜在危险区，西北地区大部分区域属于低、极低地质灾害潜在危险区。

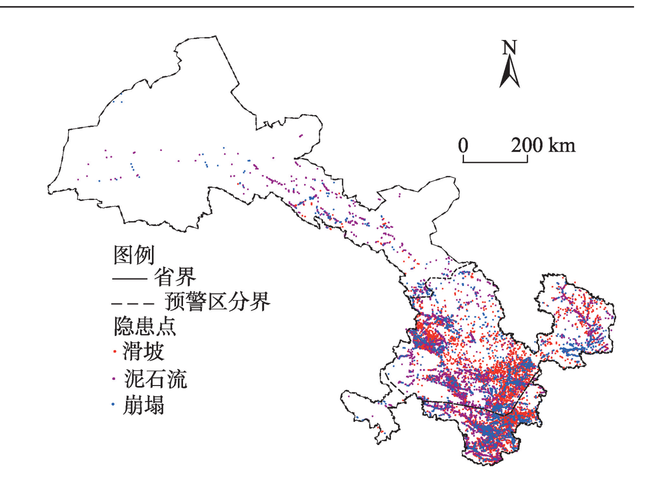


图2　甘肃省主要地质灾害隐患点分布

Fig. 2　Distribution of main geological hazards in Gansu Province

2.2　降水致灾概率拟合方程

根据2013—2021年甘肃省灾害普查到的造成人员伤亡或经济损失严重以及重大影响的地质灾害事件，结合CMPAS和降水观测数据，筛选出与降水相关的地质灾害灾情共有2553条(图4)。由降水引发的地质灾害主要分布在黄河流域的黄土高原和长江流域的陇南山地，尤以陇南市武都区、文县、康县和天水市最为集中，多次造成重大人员伤亡和人民财产损失，是本次研究的重点地区。

2.2.1　*有效雨量致灾概率拟合方程*　据统计，陇南山地和黄土高原历史地质灾情对应的有效雨量范围分别为1.18~197.21 mm、1.28~176.72 mm，按0.5%

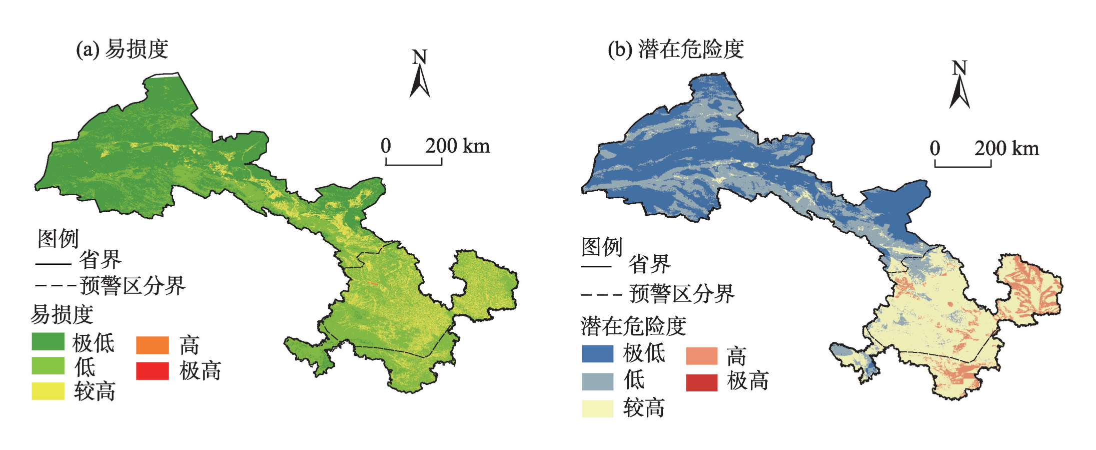


图3　甘肃省地质灾害易损度和潜在危险度分区

Fig. 3　Vulnerability and potential risk zoning of geological disasters in Gansu Province

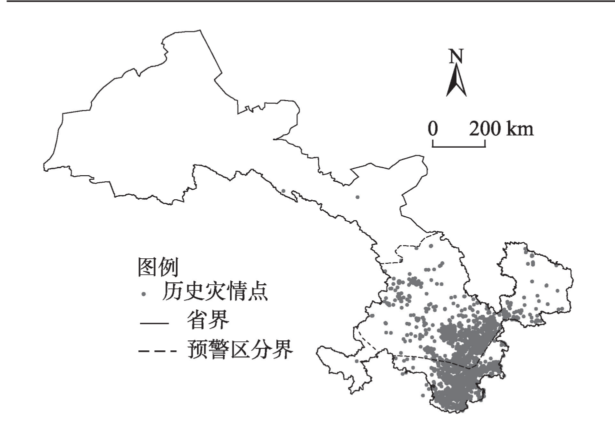


图4 2013—2021年4—10月甘肃省已发地质灾害灾情点分布

Fig. 4 Distribution of geological disaster points in Gansu Province from April to October during 2013—2021

表1 陇南山地和黄土高原有效雨量致灾概率拟合方程的确定系数

Tab. 1 Determined coefficients of fitting equation of disaster probability caused by effective rainfall in Longnan Mountain and Loess Plateau

地区	确定系数(R^2)		
	二次	三次	幂指数
黄土高原	0.991	0.993	0.913
陇南山地	0.979	0.995	0.974

间隔百分位排序，进行幂函数、二次、三次方拟合。采用确定系数(R^2)判断拟合效果(表1)，R^2越大，拟合效果越好，反之亦然。陇南山地和黄土高原三次方拟合效果较好，R^2 分别为0.995和0.993。幂次方拟合效果总体较差，因此主要探讨二次方和三次方拟合，以陇南山地为例详细阐述拟合过程。陇南山地致灾概率三次拟合曲线与观测统计曲线最接近(图5)，但当有效雨量≥168.46 mm时，致灾概率随有效雨量值增大而减小(图5a)，且当有效雨量≥152.88 mm，拟合得到的致灾概率超过100%。因此，以有效雨量值152.88 mm为分界点进行分段拟合，分别对有效雨量1.18~152.88 mm和153.87~197.21 mm序列进行拟合(图5b~c)，前者三次方拟合(R^2 = 0.999)效果优于二次方拟合(R^2 =0.985)，后者二次方拟合在高值端出现有效雨量增大而致灾概率下降现象，而三次方拟合曲线(R^2 =0.978)与观测统计曲线对应较好。因此，以15 d有效雨量152.88 mm为节点，由此构建的陇南山地有效雨量致灾概率方程为：

$$P_e = \begin{cases} 0.0043 - 3\times10^{-5}x + 1\times10^{-4}x^2 - \\ 6\times10^{-7}x^3, \quad x \leqslant 152.88 \\ -301.18 - 6.5005x - 3.53\times10^{-2}x^2 - \\ 6\times10^{-5}x^3, \quad x > 152.88 \end{cases} \tag{2}$$

式中：P_e 为有效雨量致灾概率；x 为有效雨量(mm)。

同理，对黄土高原以有效雨量为139.69 mm为节点分段拟合，有效雨量1.28~139.69 mm样本段，三次方拟合与二次方拟合 R^2 接近，均≥0.99，但有效

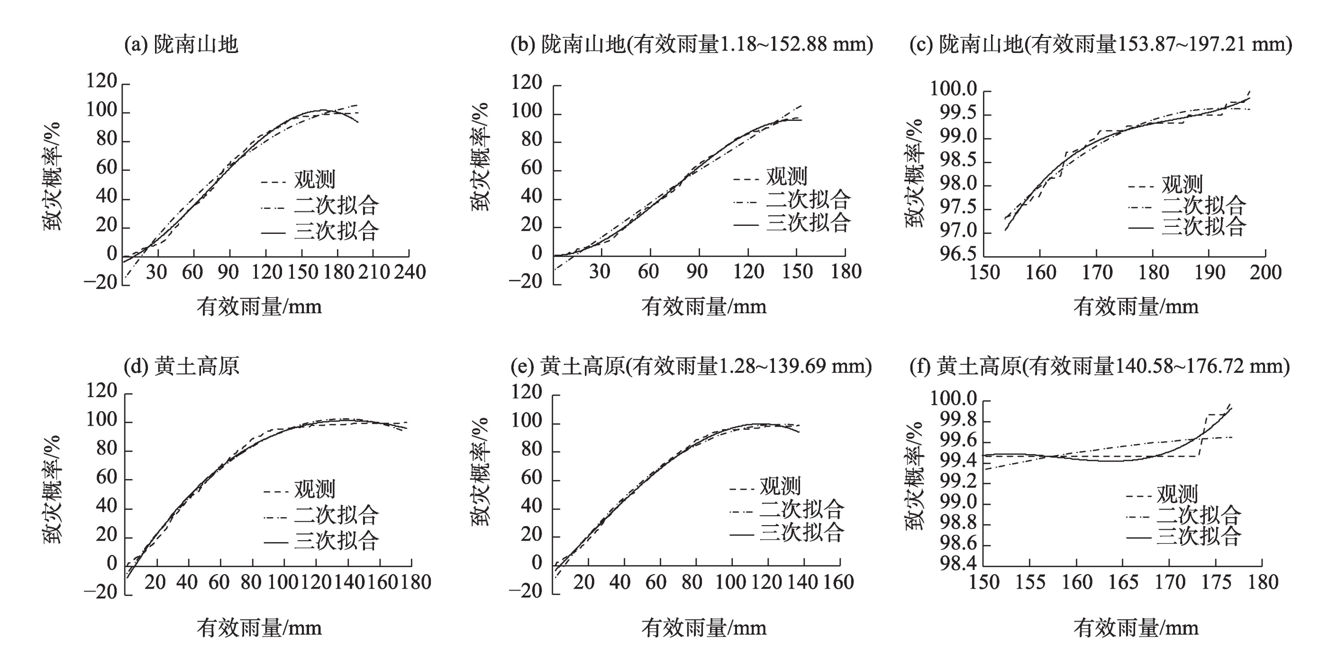


图5 甘肃省陇南山地、黄土高原有效雨量致灾概率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of disaster probability caused by effective rainfall of Longnan Mountain and Loss Plateau in Gansu Province

雨量<90 mm的样本段，三次方拟合曲线与观测统计值更为接近(图5d)，故选三次方拟合为最终拟合结果。有效雨量140.58~176.72 mm样本段，观测统计的致灾概率趋于常数0.99。因此，以15 d有效雨量139.69 mm为节点，由此构建的黄土高原地区的有效雨量致灾概率方程为：

$$P_e = \begin{cases} -0.103613 + 0.018091x - 8.717 \times 10^{-5}x^2 - 1.066 \times 10^{-7}x^3, & x \leqslant 139.69 \\ 0.99, & x > 139.69 \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 有效雨量致灾临界值 地质灾害潜在危险度与当地地质构造等有关，易损度受经济发展、土地利用及人口分布影响，在短期内可当作静态背景，而降水是变化的外部诱因。在缺乏地质灾害潜在危险度和易损度的情况下，可以只考虑降水诱发地质灾害的可能[6]。将有效雨量致灾概率20%、40%、60%和80%对应的有效雨量值，分别作为蓝色、黄色、橙色和红色地质灾害气象风险预警的临界雨量阈值(表2)。陇南山地蓝色预警临界雨量阈值为40.6 mm，远高于黄土高原(18.0 mm)，同样陇南山地红色预警临界雨量阈值远高于黄土高原，分别为113.5 mm和73.6 mm。

2.3 地质灾害气象风险模型及其检验

2.3.1 地质灾害气象风险模型及预警分级 地质灾害气象风险度定量化表达式[6]为：

$$R = P_e \times P_h \times V \quad (4)$$

式中：R为地质灾害气象风险度；V为地质灾害易损度；P_e为有效雨量致灾概率；P_h为地质灾害潜在危险度。

甘肃省地质灾害易损度分布整体较低，为较高或高易损(图3a)，地质灾害潜在危险度最高也仅是高危险(图3b)。根据甘肃省地质构造和人口分布等因素，重新建立本地易损度和潜在危险度的分级标准。通过敏感性试验，本文将地质灾害潜在危险度和易损度按不等间隔化为5级，有效雨量致灾概率按照0.2等间隔划分为5级(表3)。

在实际地质灾害气象风险预警业务中，将降水诱发的地质灾害气象风险预警等级划分为有一定风险(IV级)、风险较高(III级)、风险高(II级)、风险很高(I级)4个等级，各个等级对应的判别指标和表征颜色如表4所示。气象风险度判别指标数值介于0.004~1.000，其中红色预警指标为0.336~1.000，其余等级预警指标均低于0.336。

表2 有效雨量诱发地质灾害的致灾临界雨量

Tab. 2 Critical warning values of effective rainfall on geological disaster /mm

地区	蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警
黄土高原	18.0	32.1	50.7	73.6
陇南山地	40.6	65.2	87.9	113.5

表3 有效雨量致灾概率、地质灾害潜在危险度和易损度分级标准

Tab. 3 Classification standards for disaster probability caused by effictive rainfall, vulnerability and potential risk of geological disasters

级别	级别意义	致灾概率(P_e)	易损度(V)	潜在危险度(P_h)
V级	极低	[0.0, 0.2)	[0.0, 0.2)	[0.0, 0.1)
IV级	低	[0.2, 0.4)	[0.2, 0.4)	[0.1, 0.3)
III级	较高	[0.4, 0.6)	[0.4, 0.5)	[0.3, 0.5)
II级	高	[0.6, 0.8)	[0.5, 0.6)	[0.5, 0.7)
I级	极高	[0.8, 1.0]	[0.6, 1.0]	[0.7, 1.0]

表4 地质灾害气象风险预警等级划分

Tab. 4 Classification of meteorological risk early warning of geological disasters

级别	级别意义	气象风险度(R)	表征颜色(颜色值)
I级	风险很高	[0.336, 1.000]	红色(255, 0, 0)
II级	风险高	[0.150, 0.336)	橙色(255, 126, 0)
II级	风险较高	[0.048, 0.150)	黄色(255, 250, 0)
IV级	有一定风险	[0.004, 0.048)	蓝色(0, 102, 355)

2.3.2 地质灾害气象风险精细化网格预报试验与检验 2021年10月5日08:00至6日08:00，甘肃省东部出现了较大范围的降水，陇南市、天水市、平凉市和庆阳市部分地区有大雨，局部地方暴雨，且3日08:00至5日08:00，上述地区局部地方出现了大暴雨。强降水诱发多起地质灾害，5日上述地区出现31起地质灾害，其中天水市共发生26起，主要集中在清水县、秦州区和张家川回族自治县，庆阳市宁县共发生4起，陇南市两当县1起。灾害类型主要为滑坡(22起)和崩塌(9起)，主要影响居民家庭财产和公路交通设施，造成直接经济损失742.6×10[4]元，受灾总人数为271人，灾情均为小型地质灾害类型。选取发生在上述地区的地质灾害事件检验本地模型的预警效果。

选取2021年10月5日08:00前14 d的逐小时CMPAS和区域站降水资料以及当天QPF数据，计算

15 d有效雨量，应用本地模型和文献[6]模型，计算10月5日有效雨量、有效雨量致灾概率和地质灾害气象风险度，并对比本地模型与文献[6]模型的预警效果(图6)。有效雨量≥50 mm的区域(图6a)，有效雨量致灾概率普遍≥60%(图6b)，为红色和橙色；有效雨量≥70 mm的区域，致灾概率超过80%，本地模型风险度基本为橙色；黄色预警区域分布较零散(图6c)，灾点全部在黄色或橙色风险预警区内，即本地模型预警风险较高或高的区域与实际灾害发生区基本吻合，预警效果较好。本地拟合的有效雨量致灾概率(图6b)分布更合理，文献[6]的致灾概率(图6d)在甘肃省略偏高，可能导致其模型预报的甘肃省风险度等级偏高(图6e)。另外，本地模型预报风险度(图6c)空报区域明显减少，天水市中北部的橙色预警区域也较小。

灾点预警检验表明(表5)，灾点有效雨量致灾

表5 地质灾害气象风险模型预警检验

Tab. 5 Early warning test of geological disaster meteorological risk models

名称	统计	漏报	预警级别			
			蓝色	黄色	橙色	红色
本地有效雨量致灾概率	次数	3	0	2	11	15
	比例/%	9.7	0.0	6.4	35.5	48.4
本地模型	次数	4	0	9	18	0
	比例/%	12.9	0.0	29.0	58.1	0.0
标准模型	次数	4	0	2	22	3
	比例/%	12.9	0.0	6.4	71.0	9.7

概率红色预警次数最多，红色预警比例达48.4%，约45.2%的灾点有效雨量致灾概率超过90.0%，高等级预警比列过高，不利于实际预警决策；本地模型黄色预警比例29.0%，橙色预警比例为58.1%，预警等级分布合理，高等级空报相对较少，能有效降低高

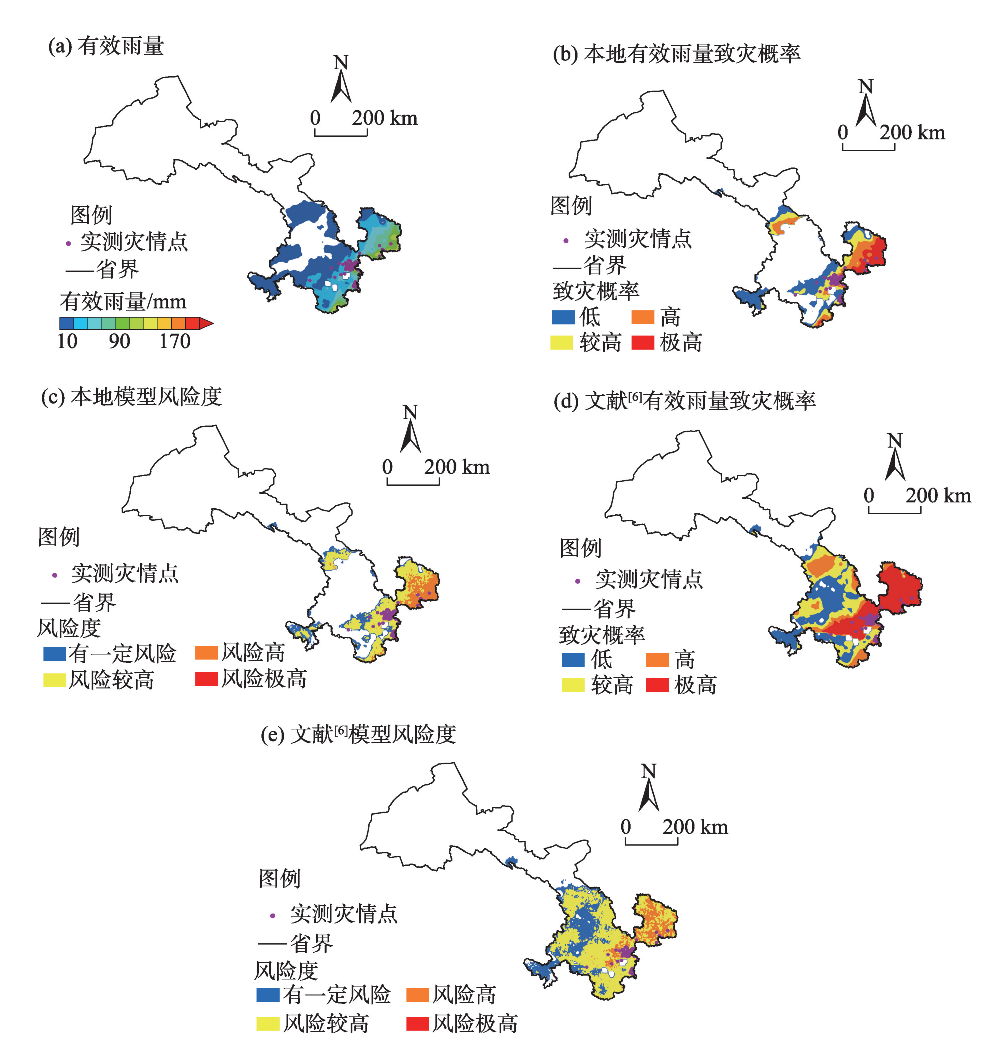


图6 2021年10月5日有效雨量和地质灾害气象风险产品

Fig. 6 Effective rainfall and the results of geological disaster meteorological risk on 5 October 2021

表6 2021年10月143个地灾样本地质灾害气象风险模型预警检验

Tab. 6 Early warning test of meteorological risk model about 143 geological disasters in October 2021

名称	统计	漏报	预警级别						
			蓝色	黄色	橙色	红色	蓝色以上	黄色以上	橙色以上
有效雨量致灾概率	次数	46	21	8	30	38	97	76	68
	比例/%	32.1	14.7	5.6	21.0	26.6	67.9	53.2	47.6
本地模型	次数	47	2	48	46	0	96	94	46
	比例/%	32.9	1.4	33.6	32.2	0.0	67.1	65.7	32.2

等级风险空报率。

本地模型对2021年10月5日的地质灾害预警效果较好，但无法评价模型的整体预报效果，因此选取2021年10月造成人员伤亡或经济损失的143起地质灾害案例作为模型预警效果的检验样本。灾情点主要分布在陇南山地东部和平庆地区，地质灾害潜在危险度为0.3~0.7，易损度为0.2~0.5，分别计算灾情点的有效雨量致灾概率和风险度。分2种情况进行预警级别统计，一是只考虑有效雨量的情况，即检验有效雨量致灾概率的预警效果，二是检验风险度指标的应用效果，即综合考虑有效雨量、地质灾害潜在危险度和易损度。

单一考虑有效雨量指标（表6）预警时，黄色预警比例偏低（5.6%），橙色和红色预警比例偏高，分别为21.0%和26.6%，红色预警次数较多可能造成防灾减灾工作量增大，不利于实际地质灾害预报预警服务工作的开展。本地模型风险度指标预警时，黄色预警（≥III级）比例最高，达33.6%，蓝色以上（≥IV级）预警比例67.1%，预警效果较好，且橙色预警和红色预警比例分别为32.2%、0，较符合实际地质灾害防范情况，表明本地模型风险度指标预警效果较好，即本地模型地质灾害气象风险预警能力较好。2种指标均可能造成一定程度的漏报。本地模型漏报较多及无红色预警可能是对蓝色预警阈值和红色预警阈值过高造成的，而这种阈值过高可能与有效雨量致灾概率阈值设置有关，后续工作中将针对本地降水特征，重新确定有效雨量致灾概率划分标准，以期达到更好的应用效果。

总体而言，有效雨量致灾概率对降水诱发的地质灾害事件也有较好的预判，但高等级预警率偏高，本地模型对甘肃省地质灾害事件的预警能力较好，较高等级的预警率有明显的降低。

3 讨 论

逐个检验2021年10月逐日风险度预警情况，发现平凉市和庆阳市中南部易出现高等级预警空报现象，李宇梅等[6]的研究亦存在此现象。对比地质灾害潜危险度、易损度与有效降雨量致灾概率发现，该地区有效雨量致灾概率、地质灾害易损度与其他地区无明显差异，但地质灾害潜在危险度等级偏高，可能导致地质灾害气象风险模型的预警等级偏高。

地质灾害隐患点均在低和较高易损度、地质灾害潜在危险度较高地区，高或很高有效降雨量致灾概率对高预警等级气象风险度贡献较大。分段拟合陇南山地和黄土高原有效降雨量致灾概率方程时，2个区域均存在灾情样本量不够充足的情况，可能造成所得的致灾概率方程不够准确，进而影响地质灾害气象风险预警模型的准确率。如地质灾害气象风险预警模型与单一考虑有效雨量致灾概率进行地质灾害气象风险预警时，均存在一定程度的漏报和误报，这可能与有效降雨量致灾概率偏大或偏小有关。西北地区由于灾情样本过于稀少，无法归纳出有效致灾概率方程。另外，后续工作中将继续收集整理地质灾情数据，更细致地分析研究区域降水与地质灾害之间的统计关系，适当调整有效雨量经验公式，重新拟合效雨量致灾概率方程，以期建立的地质灾害模型对降水型地质灾害的预警能力更好。

4 结 论

（1）利用2013—2021年4—10月甘肃省地质灾害灾情数据、降水观测资料和CMPAS降水产品及精细化网格定量降水预报产品，选取有效降雨量为降

水致灾因子，采用幂指数、二次方和三次方函数拟合方程，分别构建了陇南山地、黄土高原有效降雨量致灾概率拟合方程，确定了2个地区地质灾害蓝色、黄色、橙色和红色预警的临界降雨量阈值。

（2）根据研究区地质灾害分布特征和降雨量观测数据，结合评价指标和有关计算公式，重新对研究区地质灾害易损度、潜在危险度进行等级划分，以有效雨量致灾概率、地质灾害潜在危险度和易损度为因子建立了甘肃省地质灾害气象风险精细化网格预警模型，并通过对2021年10月已发生降雨型地质灾害事件的验证表明，该模型在甘肃省地质灾害气象风险预警性能较好，预警效果良好。

（3）通过对比研究发现，地质灾害气象风险预警模型的预警效果明显优于单一考虑有效雨量致灾概率的预警效果；相较于前人建立的地质灾害气象风险预警模型，本研究建立的模型预警效果较优，各等级预警比例更合理，更适用于甘肃省地质灾害气象风险预警的实际需求。

参考文献（References）

[1] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2): 29–34. [Li Yuan, Meng Hui, Dong Ying, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China: Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 29–34.]

[2] 狄靖月, 许凤雯, 李宇梅, 等. 东南地区引发地质灾害降水分型及阈值分析[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 62–67. [Di Jingyue, Xu Fengwen, Li Yumei, et al. Precipitation type and threshold analysis of geological disasters in southeast[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 62–67.]

[3] 高速, 周平根, 董颖, 等. 泥石流预测、预报技术方法的研究现状浅析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 279–283. [Gao Su, Zhou Pinggen, Dong Ying, et al. Study on techniques and methods for prediction and warning of debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(3): 279–283.]

[4] 魏永明, 谢又予. 降雨型泥石流(水石流)预报模型研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 6(4): 48–54. [Wei Yongming, Xie Youyu. Study on prediction models of precipitation-type debris flow[J]. Journal of natural disasters, 2015, 6(4): 48–54.]

[5] 张友谊, 胡卸文, 朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 104–107. [Zhang Youyi, Hu Xiewen, Zhu Haiyong. Prospect of research on relationship between landslide and rainfall[J]. Journal of natural disasters, 2007, 16(1): 104–107.]

[6] 李宇梅, 杨寅, 狄靖月, 等. 全国地质灾害气象风险精细化网格预报方法及其应用[J]. 气象, 2020, 46(10): 1310–1319. [Li Yumei, Yang Yin, Di Jingyue, et al. Meteorological risk assessment method of geological disaster in China and its mesh refinement application[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(10): 1310–1319.]

[7] Wang T, Li Q, Hao L Y, et al. Study on the analysis system of meteorological and geological disaster grads early warning of WebGIS [J]. Meteorological and Environment Research, 2014, 5(12): 44–48.

[8] 张国平. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 2014, 40(7): 886–890. [Zhang Guoping. Study on the relation between effective precipitation and landslide/debris-flow with probabilistic model[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(7): 886–890.]

[9] 郭富赟, 宋晓玲, 谢煜, 等. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 127–133. [Guo Fuyun, Song Xiaoling, Xie Yu, et al. A discussion on the geological hazards meteorological warning system in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26 (1): 127–133.]

[10] 陈静静, 姚蓉, 文强, 等. 湖南省降雨型地质灾害致灾雨量阈值分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 42–47. [Chen Jingjing, Yao Rong, Wen Qiang, et al. Hazard rainfall threshold analysis of rainfall-induced geological disasters in Hunan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 42–47.]

[11] 沈玲玲, 刘连友, 杨文涛, 等. 基于TRMM降雨数据的四川省地质灾害降雨阈值分析[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 220–227. [Shen Lingling, Liu Lianyou, Yang Wentao, et al. Rainfall threshold analysis for the initiation of geological disasters in Sichuan Province based on TRMM data[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 220–227.]

[12] Inagaki K, Sadohara S. Slope management planning for the mitigation of landslide disaster in urban areas[J]. Journal of Asian Architecture & Building Engineering, 2006, 5(1): 183–190.

[13] 姚学祥, 徐晶, 薛建军, 等. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005(4): 101–106, 133. [Yao Xuexiang, Xu Jing, Xue Jianjun, et al. A potential forecast model for geological-related disasters based on precipitation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005(4): 101–106, 133.]

[14] 李宇梅, 狄靖月, 许凤雯, 等. 基于当日临界雨量的国家级地质灾害风险预警方法[J]. 气象科技进展, 2018, 8(3): 77–83. [Li Yumei, Di Jingyue, Xu Fengwen, et al. A risk warning method based on the intraday critical precipitation for national geological disaster[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2018, 8(3): 77–83.]

[15] 杨寅, 包红军, 彭涛. 台风“鲇鱼”强降水引发的地质灾害气象风险预警检验与分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(3): 221–228. [Yang Yin, Bao Hongjun, Peng Tao. Verification and analysis of meteorological early warning of geological hazards during precipitation of

typhoon ‘MEGI’[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(3): 221-228.]

[16] 李阳春, 刘黔云, 李潇, 等. 基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究[J].中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 118- 123. [Li Yangchun, Liu Qianyun, Li Xiao, et al. Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 118-123.]

[17] 周明浪, 邵新民, 罗美芳. 浙江温州滑坡地质灾害预警方法及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 90-97. [Zhou Minglang, Shao Xinmin, Luo Meifang. Method and application of landslide geological hazard early-warning in Wenzhou City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 90-97.]

[18] 薛群威, 刘艳辉, 唐灿. 突发地质灾害气象预警统计模型与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1614-1622. [Xue Qunwei, Liu Yanhui, Tang Can. Early warning statistical model of sudden geological hazards and its application[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1614-1622.]

[19] 姚令侃. 用泥石流发生频率及暴雨频率推求临界雨量的探讨[J]. 水土保持学报, 1988, 2(4): 72-77. [Yao Lingkan. A research on the calculation of critical rainfall with frequency of debris flow and torrential rain[J]. Acta Conservations Soli Et Aquae Sinica, 1988, 2(4): 72-77.]

[20] 杨绚, 代刊, 朱跃建. 深度学习技术在智能网格天气预报中的应用进展与挑战[J]. 气象学报, 2022, 80(5): 649-667. [Yang Xuan, Dai Kan, Zhu Yuejian. Progress and challenges of deep learning techniques in intelligent grid weather forecasting[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(5): 649-667.]

[21] 孙帅, 师春香, 潘旸, 等. 中国区域三源融合降水产品的改进效果评估[J]. 水文, 2020, 40(6): 10-15. [Sun Shuai, Shi Chunxiang, Pan Yang, et al. The improved effects evaluation of three-source merged of precipitation products in China[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(6): 10-15.]

[22] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457. [Jin Ronghua, Dai Kan, Zhao Ruixia, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(4): 445-457.]

[23] 田冰, 王裕宜, 洪勇. 泥石流预报中前期降水量与始发日降水量的权重关系—以云南省蒋家沟为例[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 71-75. [Tian Bing, Wang Yuyi, Hong Yong. Weighted relation between antecedent rainfall and process precipitation in debris flow prediction: A case study of Jiangjia Gully in Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(2): 71-75.]

[24] 沈军, 方琼, 吴贤云, 等. 湖南古丈山体滑坡影响因子分析[J]. 气象, 2017, 43(11): 1410-1419. [Shen Jun, Fang Qiong, Wu Xianyun, et al. Analysis of impact factor of landslide in Guzhang County of Hunan Province[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43 (11): 1410-1419.]

[25] 刘业伟, 许小华, 韩会明. 基于前期有效降雨量推求山洪灾害临界雨量[J]. 水利技术监督, 2021, 40(11): 148-151. [Liu Yewei, Xu Xiaohua, Han Huiming. The critical rainfall of mountain flood disaster was calculated based on the previous effective rainfall[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021, 40(11): 148-151.]

Fine meteorological risk early warning forecast of main geological disasters in Gansu Province

ZHANG Junxia[1], HUANG Wubin[1], LI Antai[2], YANG Xiumei[1], LI Qian[1], BIAN Hongwei[2]

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Lanzhou Dafang Electronics Co. Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Geological disasters frequently occur in Gansu Province, China, and the proportion of precipitation-type geological disasters is significant in this region. Based on the geological disaster data, encrypted precipitation observations and the CMA multi-source merged precipitation analysis system pertinent to April to October of each year from 2013 to 2021 in Gansu Province, the effective rainfall data were selected as the precipitation factor; and further the geological disaster probability fitting equations of effective rainfall for the two regions were established. A refined grid geological disaster meteorological risk early warning model is constructed using the disaster probability of the precipitation factor, potential risk of geological disaster, and vulnerability. Using real precipitation data and the fine gridded prediction forecasts (QPF) of the Lanzhou Central Meteorological Observatory, a mesh refinement forecast test of the risk model was established to test the geological disaster events that occurred in October 2021 in Gansu Province. The study results show the following: (1) Based on the disaster probability caused by effective rainfall, the critical effective rainfall thresholds of blue, yellow, orange, and red warning levels of geological disasters in the Loess Plateau and Longnan Mountains, respectively. Among them, the critical effective rainfall thresholds for blue and red warning levels in Longnan Mountains are 40.6 mm and 113.5 mm, respectively, which were significantly higher than the blue and red warning levels of 18.0 mm and 73.6 mm, respectively, in the Loess Plateau. (2) The risk discrimination indices of blue, yellow, orange, and red early warning levels of geological disaster meteorological risk in Gansu Province were determined. The index values ranged from 0.004 to 1.000, with values ranging from 0.336 to 1.000, indicating an early red warning level. (3) The refined grid geological disaster meteorological risk early warning model in Gansu Province can effectively provide a warning of geological disaster events, the proportion of each level of early warning is reasonable, and it can effectively reduce the high-level early warning rate and false alarm rate. Thus, the model shows a strong ability to provide geological disaster meteorological risk early warnings.

Key words: geological disaster; meteorological risk; effective rainfall; disaster probability caused by effective rainfall; Gansu Province